

Acoplamento de Modelo Não-Linear de Diodo com o Método dos Elementos Finitos

Silvio Ikuyo Nabeta* Kay Hameyer** Herbert De Gersem**

*Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil

**Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica

Resumo — Este trabalho apresenta o acoplamento fraco de diodos com o Método dos Elementos Finitos. Os diodos são modelados através de uma equação não-linear e o acoplamento destes com o programa de elementos finitos é realizado através do *MATLAB*. A aplicação se faz com o estudo passo a passo no tempo de um indutor alimentado por uma fonte de tensão senoidal e uma ponte retificadora de meia onda. Os resultados numéricos são comparados com aqueles advindos da utilização de um modelo *on-off* para os mesmos diodos e do programa de análise de circuitos elétricos *HSpice*.

Palavras-chaves — Modelo não-linear, Método dos Elementos Finitos, Acoplamento de Circuitos Elétricos.

I. INTRODUÇÃO

O acoplamento de circuitos elétricos ao Método dos Elementos Finitos (MEF) foi de grande importância na área de cálculo de campos. Tal acoplamento permitiu, por exemplo, as considerações de fontes de tensão e de componentes e parâmetros externos ao domínio de estudo pelo MEF. Neste último item, a inclusão de circuitos a semicondutores foi um dos avanços dos mais relevantes pois permitiu a análise conjunta do dispositivo com seu acionamento e/ou conversor.

De forma geral, existem duas abordagens para o acoplamento de circuitos elétricos ao MEF:

1. Acoplamento Forte, no qual as equações advindas do MEF e da análise de circuitos elétricos são dispostas juntas no mesmo sistema matricial e a resolução esta última fornece as soluções magnéticas (MEF) e elétricas (Circuitos) simultaneamente.
2. Acoplamento Fraco, no qual os sistemas de equações do MEF e de circuitos elétricos são distintos e a resolução de ambas é realizada de forma iterativa.

Neste trabalho é apresentada uma análise MEF e equações de circuito, bidimensional e passo a passo no tempo, através de um acoplamento indireto de um retificador de meia-onda com um indutor. Os diodos integrantes do circuito retificador são modelados através de uma expressão não-linear enquanto que o material ferromagnético do indutor é considerado sem saturação.

Os resultados obtidos são comparados àqueles advindos de simulações numéricas com um modelo simplificado para os mesmos diodos (chaves on-off) e resultados do programa de análise de circuitos *HSpice*.

II. MODELO DO DIODO

No presente trabalho dois modelos para o diodo foram implementados. No primeiro, foi considerado um modelo simplificado através de uma chave perfeita do tipo “on-off”, enquanto que no segundo modelo foi considerada uma expressão não-linear para a tensão sobre o diodo.

As subseções a seguir mostram os modelos implementados em detalhes.

Modelo On-Off

Neste modelo, o diodo é considerado como sendo uma chave perfeita, ou seja, na condução o diodo está na condição “on”, enquanto que no bloqueio o diodo se encontra na condição “off”. Neste modelo não é considerada nenhuma queda de tensão nos diodos. A Fig. 1 apresenta o modelo em questão.

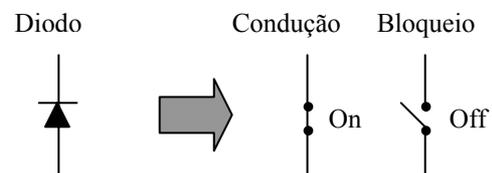


Fig. 1: Modelo On-Off

Modelo Não-Linear

O modelo não-linear considera uma relação não-linear entre a tensão e a corrente no diodo. A equação (1) apresenta a relação utilizada neste trabalho [1].

$$V_D = V_T \ln\left(\frac{I_D}{I_S} + 1\right) + R_S I_D \quad (1)$$

Na qual: V_T é a tensão termodinâmica;
 I_S é a corrente de saturação reversa;
 R_S é a resistência interna.

III. O PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS

O programa computacional de elementos finitos utilizado foi o *Olympos* [2], o qual foi desenvolvido pela equipe da Katholieke Universiteit Leuven e é baseada em plataforma Unix

O programa *Olympos* permite análises bidimensionais e passo a passo no tempo..

O esquema passo a passo no tempo utilizado é apresentado em (2) [2].

$$\left(\alpha K + \frac{R}{\Delta t}\right)A_k + \left((1-\alpha)K - \frac{R}{\Delta t}\right)A_{k-1} - (\alpha T_k + (1-\alpha)T_{k-1}) = 0 \quad (2)$$

Na qual: K é a matriz de coeficientes dos elementos;
 R é a matriz global;
 T_{k-1} e T_k são os vetores de fonte para $t=t_{k-1}$ e $t=t_k$, respectivamente;
 α é o fator de ponderação.

IV. PROBLEMA ABORDADO

O problema sob análise é constituído de um indutor o qual é alimentado por uma fonte de tensão senoidal acoplado a uma ponte retificadora de meia-onda. A Fig. 2 mostra a configuração usada.

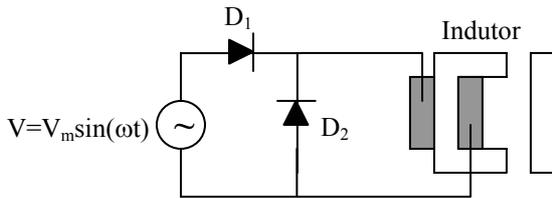


Fig. 2: Problema Analisado

O indutor é formado por um núcleo ferromagnético linear, $\mu_r=1000$, e uma bobina com 100 espiras.

Os diodos D_1 e D_2 são modelados segundo (1) com parâmetros retirados do catálogo para o diodo comercial modelo MBR4015CTL [4].

Aa fonte de tensão senoidal possui valor $V_m=10$ V.

O passo de tempo foi fixado em 0.5 ms.

V. O ACOPLAMENTO MEF E EQUAÇÕES DE CIRCUITO

O acoplamento do programa de elementos finitos *Olympos* com os modelos, on-off e não-linear, do diodo foi realizado através do programa *Matlab* [3]. O *Matlab* operou como um gerenciador que verificava as condições de condução ou bloqueio dos diodos envolvidos acionando ou não o programa *Olympos*.

Os detalhes desse gerenciamento para o acoplamento com cada modelo são apresentados a seguir.

Modelo On-Off

Neste modelo os diodos D_1 and D_2 foram considerados como chaves ideais sem queda de tensões sobre as mesmas.

A figure 3 apresenta de forma esquemática a função do *Matlab* como gerenciador.

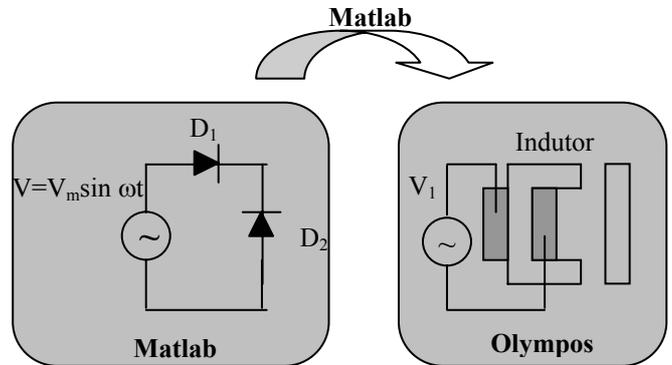


Fig. 3: Acoplamento MEF e modelo on-off

Para esse acoplamento a função do *Matlab* é verificar as condições de condução/bloqueio dos diodos D_1 e D_2 e aplicar a tensão conveniente nos terminais do indutor através do programa *Olympos*.

A Tabela I a seguir apresenta as condições para os diodos D_1 e D_2 e as respectivas tensões transferidas ao programa *Olympos*.

TABELA I
 MODELO ON-OFF

	Valor de V_1
D_1 On & D_2 Off	$V_m \sin \omega t$
D_1 Off & D_2 On	0

Modelo Não-Linear

Para este modelo, face à não-linearidade de (1), foi utilizada uma metodologia iterativa.

A Fig. 4 apresenta de forma esquemática essa metodologia.

Novamente, o *Matlab* opera como gerenciador verificando as condições de condução/bloqueio dos diodos D_1 e D_2 e transferindo o valor de tensão conveniente ao programa *Olympos*, considerando, desta vez, a tensão V_D no diodo.

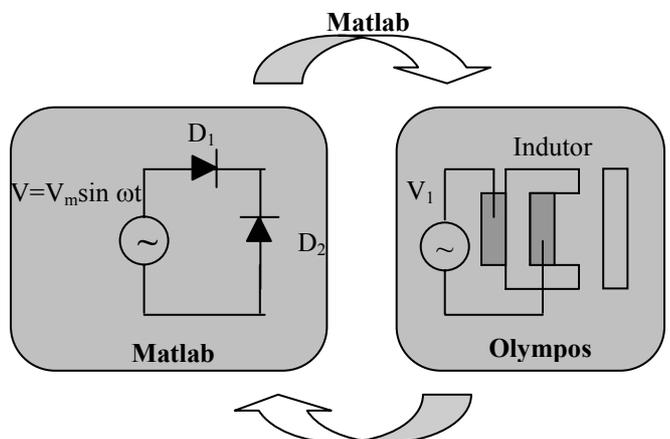


Fig. 4: Acoplamento MEF e modelo não-linear

Para cada passo de tempo as corrente em ambos os blocos, *Olympos* e *Matlab*, são calculadas e um processo iterativo se instala até que haja uma convergência entre os dois valores.

A Tabela II apresenta o valor de tensão transferido para o programa *Olympos* em função das condições dos diodos.

TABELA II
MODELO NÃO-LINEAR

	Valor de V_1
D_1 On & D_2 Off	$V_m \sin \omega t - V_D$
D_1 Off & D_2 On	$-V_D$

A tensão sobre o diodo V_D é calculada pela equação (1).

VI. SIMULAÇÕES NUMERICAS

O problema proposto consiste de um indutor alimentado por uma fonte de tensão senoidal através e um retificador de meia-onda, conforme mostrado na Fig. 2.

O núcleo do indutor é constituído de um material ferrognetico linear (sem saturação) com permeabilidade magnética relativa $\mu_r = 1000$.

A bobina possui 100 espiras e a fonte de tensão é do tipo $V=10 \cdot \sin \omega t$, com frequência $f=50$ Hz.

Os diodos D_1 e D_2 são comerciais e do tipo MBR4015 CTL da ON Semiconductors e cujos parâmetros foram obtidos em [4].

As seguintes simulações em 2D e passo a passo no tempo foram realizadas no problema proposto:

1. MEF e modelo ON-Off para D_1 e D_2 ;
2. MEF e modelo Não-Linear para D_1 e D_2 .

A discretização da geometria do indutor forneceu uma malha de elementos finitos de 342 nós.

Previamente, no intuito de se determinar a resistência ôhmica e a indutância do indutor, uma simulação MEF em regime permanente senoidal foi realizada. A Fig. 5 mostra a configuração usada para essa simulação.

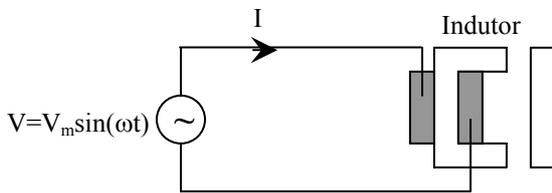


Fig. 5: Configuração para a simulação em regime permanente senoidal

Assumindo \bar{V} e \bar{I} como as notações fasoriais de V e I , a impedância $\bar{Z} = (R + j\omega L)$ pode ser facilmente determinada por (3).

$$\bar{Z} = \frac{\bar{V}}{\bar{I}} \quad (3)$$

Obteve-se, assim, os valores de $L=13.96$ mH e $R=0.17$ Ω para a indutância e a resistência, respectivamente, do indutor.

Esses valores foram utilizados no programa de análise circuitos elétricos *HSpice* para a validação do modelo não-linear proposto, conforme descrito na seção a seguir.

VII. SIMULAÇÃO HSPICE

Para fins de comparação e validação dos resultados da simulação do acoplamento MEF e modelo não-linear, uma simulação *HSpice* foi também realizada.

O *HSpice* é um programa para análise de circuitos elétricos e eletrônicos baseado em plataforma Unix [5]. Convém lembrar que este programa utiliza modelos não-lineares para os semicondutores sendo, para o diodo, mais complexo que aquele descrito por (1).

O circuito usado na simulação *HSpice* é apresentado na Fig. 6 com os valores de resistência e indutância obtidos na simulação MEF em regime permanente senoidal apresentada anteriormente.

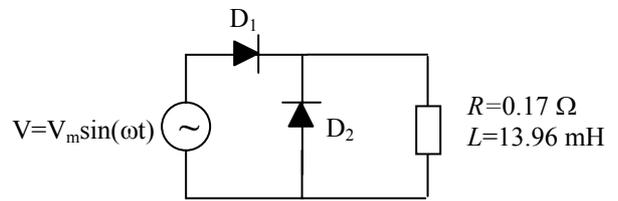


Fig. 6: Circuito usado na simulação *HSpice*

Os diodos D_1 e D_2 foram modelados através de parâmetros fornecidos pelo fabricante no endereço [4] para o diodo comercial MBR4015CTL e específicos para programas da família *Spice*.

VIII. RESULTADOS

O parâmetro analisado nas simulações foi a evolução da corrente no indutor em função do tempo.

A Fig. 7 apresenta a comparação de resultados para as diversas simulações realizadas.

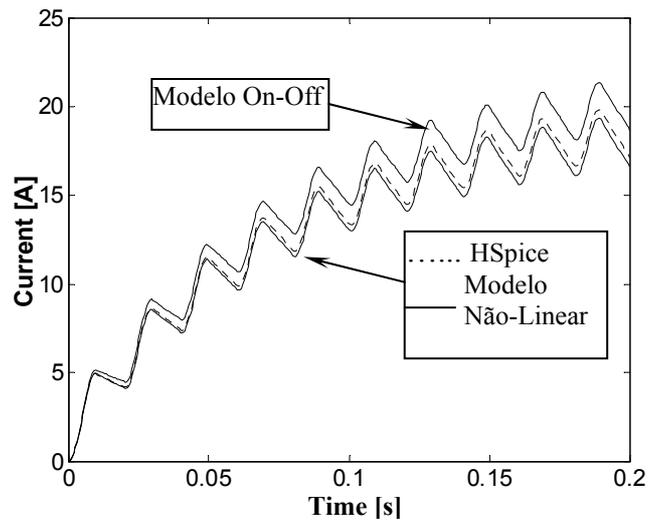


Fig. 7: Comparação de Resultados

CONCLUSÕES

Considerando o resultado da simulação *HSpice* como referência, uma vez que este usa modelos mais completos e complexos para os diodos, observa-se que, para o caso estudado, o modelo On-Off apresentou resultados não satisfatórios, enquanto que o modelo não-linear resultou numa curva com boa concordância com aquela obtida pela simulação *HSpice*.

Mais ainda, face a esta última observação, pode-se concluir que (1) representa de forma satisfatória a atuação dos diodos.

Embora os resultados sejam promissores, é importante a realização de simulações complementares, principalmente com outros valores de tensões e com materiais ferromagnéticos saturáveis, para uma melhor avaliação dos modelos propostos.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Antognetti, G. Massobrio, *Semiconductor Device Modeling with SPICE*, New York, McGraw Hill, 1987.
- [2] *Olympos*, Finite Element Package, ESAT/ELEN, 2001, <http://www.esat.kuleuven.ac.be/elen/research/software-development/>
- [3] *Matlab* v. 6.0, Mathworks, 2000.
- [4] ON Semiconductors, <http://www.onsemi.com>
- [5] *Star-HSpice*, HP platform, 2000